

Warszawa, 28.12.2023 r.

Prof. dr hab. inż. Eugeniusz Koda
Instytut Inżynierii Lądowej
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Artura Górala
**pt. „Direct and inverse artificial neural networks as auxiliary tools
in numerical solutions of selected problems of soil-structure interaction
in geotechnical engineering”**

(pol.: „Sztuczne sieci neuronowe „wprost” i sieci odwrotne
jako narzędzia pomocnicze w numerycznych rozwiązaniach wybranych problemów
interakcji grunt-struktura w geoinżynierii”)

1. Wstęp

Recenzję rozprawy doktorskiej mgr. inż. Artura Górala opracowano na zlecenie Dziekana Wydziału Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska z 23 października 2023 r., realizującego Uchwałę Rady ds. Stopni Naukowych Politechniki Łódzkiej.

Opiniowana rozprawa została napisana w języku angielskim i zawiera 156 stron druku formatu A4 (tekst z Bibliografią i 2 załącznikami), oraz 30 stron wprowadzających (oznaczone I-XXX), w tym: *strona tytułowa, Spis treści, Podziękowania, Abstract w języku angielskim, Streszczenie w języku polskim, Wykaz symboli, Wykaz skrótów i akronimów, Spis rysunków i Spis tablic*. Ponadto, drogą mailową przesłano elektroniczną wersję pracy w pliku .pdf.

Głównym celem rozprawy było sprawdzenie (przetestowanie) możliwości wykorzystania sztucznych sieci neuronowych do rozwiązania zagadnienia odwrotnego w zastosowaniach z zakresu inżynierii geotechnicznej.

Tezą podstawową rozprawy postawioną w rozdziale pierwszym było wykazanie że: „*Sztuczne sieci neuronowe są szczególnie skutecznym narzędziem rozwiązania zagadnienia odwrotnego*”.

Dla osiągnięcia powyższego celu i udowodnienia postawionej tezy rozprawy, Doktorant przedstawił metodę rozwiązania zagadnienia odwrotnego z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych i przeprowadził ten sposób na kilku przykładach z zakresu geotechniki, wykazując jego skuteczność. Doktorant przedstawił również sposób formułowania uproszczonego modelu numerycznego z wykorzystaniem metody elementów skończonych do rozwiązania zagadnienia odwrotnego. Metodę wykorzystania sztucznych sieci neuronowych do rozwiązania zagadnienia odwrotnego zaplanowano i przeprowadzono prawidłowo.

2. Treść i charakterystyka pracy

Praca doktorska mgr. inż. Artura Górala składa się ze streszczenia w języku angielskim i polskim, spisu treści, wykazu symboli, skrótów i akronimów, spisu rysunków (51 rysunków w treści pracy i 15 rysunków w załącznikach) i spisu tablic (6 tablic w treści pracy i 6 tablic w załącznikach), ośmiu rozdziałów, w tym Bibliografii (166 pozycji), oraz dwóch załączników (A - Problemy formułowania modelu fundamentu palowego za pomocą programu Plaxis FEM, oraz B - Kody źródłowe solverów stworzonych w pracy doktorskiej).

Praca układa się w logiczną całość, łączącą elementy mechaniki gruntów i geotechniki oraz analizy numeryczne zagadnień geotechnicznych z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych.

Rozdział 1 – *Wstęp* (6 stron), zawiera wprowadzenie do tematu i uzasadnienie podjęcia badań oraz cel, tezę i zakres rozprawy. Ponadto, Doktorant zamieścił we Wstępie wykaz (Tablica 1.1) narzędzi badawczych do określania właściwości i parametrów inżynierskich do modeli (dla zadania bezpośredniego) w geotechnice i mechanice gruntów, wskazując na problemy i ograniczenia w ich stosowaniu.

Rozdział 2 – *Sztuczne Sieci Neuronowe* (21 stron), Doktorant dokonał przeglądu literatury obejmującego historię wprowadzenia i rozwoju sztucznych sieci neuronowych oraz ich teoretycznych i koncepcyjnych podstaw. Przedstawiono algorytm działania sztucznej sieci neuronowej oraz poszczególnych jej elementów, wskazując na przedstawienie właściwości sztucznej sieci neuronowej jako uniwersalnego aproksymatora funkcji, funkcjonau lub operatora, co zastosowano we wszystkich przykładach przedstawionych w rozprawie. Doktorant używał przeważnie sztuczną sieć neuronową jako substytut rozwiązania uzyskanego MES (sieć nauczana rozwiązaniami z wykorzystaniem MES dla różnych parametrów materiałowych).

Rozdział 3 – *Zagadnienie „wprost” i odwrotne* (34 stron). Doktorant formułuje zagadnienia „wprost” i odwrotne oraz związane z nimi rozwiązania „wprost” i odwrotne. Zaznacza że o ile problem „wprost” jest wykorzystywany do problem projektowania konstrukcji, to problem odwrotny może być interpretowany jako model (teoretyczny i/lub numeryczny) eksperymentu. W eksperymencie mierzymy przemieszczenia dla znanego naprężenia, określonej geometrii próbki i zadanych ograniczeń, natomiast parametry mechaniczne materiału są nieznane i mogą być wyznaczone z tych danych. Zagadnienie odwrotne rozwiązuje podstawowy problem praktyczny, pozwala określić parametry mechaniczne materiału. Ma to szczególne znaczenie w inżynierii geotechnicznej, gdzie trudno jest określić wartości parametrów mechanicznych gruntu do ciągle rozwijanych metod numerycznych. W rozprawie przedstawiono metodę rozwiązania problemu odwrotnego, która opiera się na wykorzystaniu sztucznych sieci neuronowych jako narzędzia pomocniczego. Rozwiązanie odwrotne może być aproksymowane przez trenowanie sztucznej

sieci odwrotnej przy użyciu tego samego zestawu rozwiązań testowych, jak dla problemu bezpośredniego. Biorąc po uwagę fakt, że sztuczne sieci neuronowe są uniwersalnymi aproksymatorami, dobrze wytrenowane sieci mogą więc być doskonałym przybliżeniem zarówno rozwiązań bezpośrednich, jak i odwrotnych. Zdaniem Autora, „dzięki zastosowaniu sieci neuronowych, problem odwrotny może być łatwo rozwiązany, nawet bez potrzeby formułowania go, bazując na dobrze znanych klasycznych rozwiązaniach problemu „wprost””. Podkreślam wysoką wartość metodyczną, poznawczą i aplikacyjną tej części rozprawy. Rozdział ten uznaję za najważniejszą wartość ocenianej rozprawy doktorskiej.

Rozdział 4 – *Interpretacja wyników statycznego obciążenia pali (SLT) przy użyciu sztucznej sieci neuronowej* (29 stron). Doktorant przedstawia przykład zastosowania zaproponowanego rozwiązania odwrotnego, wspomaganego sztuczną siecią neuronową, do oszacowania nośności pala na podstawie testu statycznego obciążania pala. Założono, że przemieszczenia pionowe pala, uzyskane podczas statycznego obciążenia, mogą być aproksymowane krzywą Meyera Kowalowa. Trzy parametry tej krzywej (przemieszczenie w funkcji obciążenia) są nieznanymi parametrami tego związku, ustalonymi jako rozwiązanie zagadnienia odwrotnego. Pokazano jak wytrenować sieć „wprost” aproksymującą krzywą doświadczalną uzyskaną w wyniku testu oraz jak wytrenować sieć odwrotną, na której wyjściu można uzyskać nieznanne parametry krzywej Meyera-Kowalowa, w tym nośności pala. Nowym elementem analizy jest próba rozdzielenia nośności całkowitej pala, na nośność poboczniczy i nośność podstawy pala, wykorzystując jedynie dane uzyskane z wykresu nośności pala z próbnego obciążenia. Jest to możliwe dzięki zastosowaniu sztucznych sieci neuronowych do analizy zagadnienia odwrotnego.

Rozdział 5 – *Identyfikacja parametrów nawierzchni warstwowej* (15 stron). Doktorant przedstawia kolejny przykład zastosowania sztucznych sieci neuronowych do interpretacji dynamicznego ugięcia nawierzchni w teście FWD, stosowanym do oceny właściwości mechanicznych warstw nawierzchni i podbudowy dróg, posadzek oraz lotnisk. Dla przemieszczeń w punktach obserwacyjnych testu FWD wytrenowano sieć neuronową „wprost” oraz sieć odwrotną. Odpowiednio wytrenowana sieć odwrotna dostarcza rozwiązania problemu odwrotnego, uzyskiwanego tradycyjnie drogą kosztownych numerycznie rozwiązań zagadnienia minimalizacji funkcjonału z więzami. W podejściu klasycznym identyfikowane warstwy podłoża są reprezentowane przez model sprężysty półprzestrzeni uwarstwionej, natomiast w proponowanej metodzie model podłoża ograniczony jest jedynie możliwościami użytego programu MES do modelowania zagadnienia „wprost”.

Rozdział 6 – *Redukcja zagadnień w inżynierii geotechnicznej* (26 stron). Kolejny koncepcyjny rozdział Autorski, przedstawiający propozycję redukcji złożonego modelu geotechnicznego,

zawierającego interakcję struktury budowlanej z ośrodkiem gruntowym. Koncepcję opisano na przykładzie klasycznych modeli Winklera i Pasternaka, w których (oraz w innych podobnych) podstawowym problemem jest oszacowanie parametrów wprowadzonych więzów w zależności od właściwości gruntu. Proponowana koncepcja polega na zbudowaniu złożonej sieci neuronowej, której pierwszy element jest fragmentem sieci „wprost” wytrenowanej modelem „odniesienia”, zaś drugi fragment pochodzi z sieci odwrotnej. Doktorant zaproponował sposób konstrukcji takiej sieci, złożonej dla dwóch prostych przykładów. „Na wyjściu tej sieci otrzymuje się parametry więzów modelu zredukowanego w funkcji parametrów gruntu, które zastępują te więzy w modelu odniesienia. Zaproponowana procedura jest automatyczna i może być w przyszłości zastosowana do modelowania bardziej złożonych zagadnień geotechnicznych”.

Rozdział 7 – *Wnioski i kierunki przyszłego rozwoju* (4 strony), w którym Doktorant podsumował uzyskane wyniki i treść rozprawy, sformułował wnioski, nowe elementy i perspektywy dotyczące kierunków dalszych badań związanych z rozwojem i wdrażaniem sztucznych sieci neuronowych do rozwiązywania zagadnień odwrotnych z zakresu projektowania inżynierskiego. Sformułowane wnioski są poparte uzyskanymi wynikami przeprowadzonych analiz przez Doktoranta i opisanych w treści rozprawy. Przedstawił również ograniczenia metody. Wnioski są poprawne i cenne, wskazują na udowodnienie postawionej na wstępie tezy i osiągnięcie celu rozprawy.

Kolejną (8) częścią rozprawy jest *Bibliografia* (166 pozycji, 9 stron). Wykaz wykorzystanych źródeł jest bardzo obszerny, zawiera zarówno pozycje książkowe, artykuły z renomowanych czasopism, jak i z materiałów konferencyjnych oraz normy. Również pod względem chronologicznym należy uznać wykaz za wzorcowy, obejmujący zarówno pozycje wcześniejsze jak i najnowsze, nawet z 2023 roku.

Dodatkowymi składnikami rozprawy są dwa Załączniki. Appendix A: Problemy formułowania modelu fundamentu pałowego za pomocą programu Plaxis FEM, oraz Appendix B - Kody źródłowe solverów stworzonych w pracy doktorskiej, oznaczone od A do H.

Strukturę i układ pracy uznaję za prawidłową, zawierającą dobrze opisane cele i tezę badawczą, ulokowanie aktualnej problematyki badań w literaturze polskiej i zagranicznej. Na wyróżnienie zasługuje dobrze opanowana przez Doktoranta metodyka analizy numerycznej nietypowych zagadnień inżynierskich na potrzeby projektowania oraz znajomość i wykorzystanie sztucznych sieci neuronowych do rozwiązywania zagadnień odwrotnych.

Praca spełnia kryteria solidnego opracowania naukowego o charakterze analitycznym i obliczeniowym, posiada aspekty poznawcze i aplikacyjne.

3. Ogólna ocena pracy

Podstawowym problemem projektowania geotechnicznego jest opracowanie modelu i rozwiązanie zagadnienia opisującego wzajemną interakcję struktury budowli i podłoża gruntowego. Przy przyjętych założeniach zwykle uzyskuje się rozwiązanie w formie przybliżonej, na przykład z wykorzystaniem metod numerycznych. Specyfika ośrodka gruntowego, w porównaniu do innych materiałów budowlanych, polega na jego niejednorodności, a co za tym idzie trudności w rozpoznaniu właściwości fizycznych i parametrów (charakterystyk) mechanicznych. Badania bezpośrednie zwykle pozwalają na określenie właściwości w określonym miejscu, gdzie wykonywane jest badanie in situ lub pobierana próbka do badań laboratoryjnych. Zagadnienie brzegowe, które jest podstawą matematyczną projektowania geotechnicznego wymaga podania parametrów konstrukcji budowli i podłoża gruntowego. Parametry te są danymi wejściowymi do opisu związków konstytutywnych. W przypadku podłoża gruntowego, zwiększenie liczby oznaczeń powoduje wzrost kosztów i czasu niezbędnego do określenia reprezentatywnych właściwości (parametrów, charakterystyk) niezbędnych do przeprowadzenia obliczeń (lub modelowania numerycznego). Dlatego w praktyce geotechnicznej często wykorzystuje się wyniki obserwacji (monitoringu) na podobnych obiektach do wyznaczania parametrów na podstawie tzw. analizy wstecznej.

Doktorant rozszerzył obszar identyfikacji parametrów materiałowych na podstawie „zagadnienia odwrotnego”, wykorzystując do tego celu sztuczne sieci neuronowe. Przyjął założenie, że zagadnienie brzegowe będzie nazywane zagadnieniem „wprost”, natomiast zagadnienie identyfikacji parametrów materiałowych w równaniach konstytutywnych będzie określane jako zagadnienie „odwrotne”. Metody rozwiązań inżynierskich zagadnień brzegowych przy znanych parametrach materiałowych (danych wejściowych) są znane i powszechnie stosowane, natomiast zagadnienie „odwrotne”, wymagające określenia wartości parametrów materiałowych, nie jest typowe w projektowaniu inżynierskim. Dlatego podjęta w rozprawie problematyka ma charakter poznawczy, z ukierunkowaniem rozwoju w kierunku aplikacyjnym.

Doktorant posiada dobre przygotowanie merytoryczne do prowadzenia modelowania numerycznego, a wybór tematu rozprawy jest właściwy i aktualny, poparty wieloletnim doświadczeniem w tym zakresie. Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych w inżynierii geotechnicznej jest nadal zagadnieniem nie rozpoznany.

Uzyskane z badań wyniki stanowią cenny materiał eksperymentalny, rzadko przeprowadzany w tak kompleksowym metodycznym zakresie na rzeczywistych przykładach projektowych. Zebrane dane pozwoliły na ocenę wpływu wielu parametrów i czynników mających znaczenie przy projektowaniu geotechnicznym.

Oceniana praca doktorska ma zarówno charakter poznawczy, jak i aplikacyjny, między innymi z uwagi na intensywną działalność inwestycyjną w ostatnich 20. latach przebudowy infrastruktury komunikacyjnej w Polsce. Wyniki przeprowadzonych analiz powinny być jeszcze zweryfikowane dla złożonych warunków gruntowych i innych zagadnień geotechnicznych, również w warunkach ekstremalnych, aby mogła być szerzej stosowana w praktyce inżynierskiej. Najkorzystniej by było, aby dalsze analizy były prowadzone też przy realizacji określonych zadań inwestycyjnych.

Praca ma również charakter metodyczny. Autor podaje w niej szczegółową metodykę postępowania przy wykorzystywaniu sztucznych sieci neuronowych do rozwiązywania zagadnień geotechnicznych oraz prowadzenie obliczeń z wykorzystaniem narzędzi numerycznych. W każdym z rozdziałów Doktorant wprowadził własne elementy i komentarze dotyczące przedmiotu rozprawy. Postawiony cel rozprawy został osiągnięty, a teza rozprawy udowodniona przeprowadzoną analizą, wynikami badań i modelowania oraz ich interpretacją.

4. Uwagi krytyczne i pytania

Przy czytaniu pracy zauważono zbyt skrótowe opisy niektórych zagadnień, nieuporządkowaną terminologię specjalistyczną oraz drobne błędy edycyjne. Przedstawiam też uwagi ogólne i szczegółowe o charakterze merytorycznym oraz kwestie dyskusyjne. Mimo że nie umniejszają one wartości pracy, proszę Doktoranta o ustosunkowanie się do niektórych z nich:

- Na stronie 13 i na Rys. 2.3 - Autor słusznie zauważył, że „*algorytmy ML rozwiązują problemy klasyfikacji, regresji czy grupowania*”. Moim zdaniem, logiczną kontynuacją tego stwierdzenia byłoby uzasadnienie, do jakiego rodzaju problemów należy aproksymacja funkcji. Proszę o rozwinięcie tego zagadnienia podczas obrony.
- Na rys. 2.5 Autor pokazał różne funkcje aktywacji. Niestety funkcje nie zostały odpowiednio/wyczerpująco skomentowane. Z części badawczej rozprawy wynikało, że Autor posłużył się funkcją sigmoidalną. Proszę uzasadnić swój wybór i wskazać, na jakich warstwach modelu zastosowano funkcję sigmoidalną (?).
- Strona 19 - Autor zauważył, że „*Data set should be divided into mentioned subset in 0.7; 0.15; 0.15 proportion, respectively.*” Nie zgadzam się z tym stwierdzeniem, ponieważ rozkłady 80/10/10, 60/20/20 i inne opcje kombinacji, są równie powszechnie stosowane w analizach. Jednocześnie w części badawczej rozprawy Autor zastosował podział na dwa zbiory danych (trenujący i testujący), bez wykorzystania/wskazania zbioru do walidacji. Proszę o rozwinięcie tego zagadnienia podczas obrony rozprawy.
- Strony 19-20 - Autor podał „*Parameters related to learning process*”, brakuje jednak informacji i uzasadnienia wykorzystania w przypadku kilku ważnych parametrów.

Loss function - Autor twierdzi (str. 20), że „*One of the most popular loss functions, that will be used in this doctoral dissertation is Mean Squared Error (MSE).*” Jednocześnie w części badawczej pracy wykorzystano RMSE. Niestety Autor nie dodał wzoru, ani nie opisał logiki obliczania żadnej z tych funkcji.

Funkcja optymalizacji. Nie znalazłem w rozprawie informacji jaki optymalizator został użyty do ograniczenia strat.

Klasycznie przyjętą metodą oceny efektywności SSN jest ocena pary parametrów – „loss function/korelacja”. Z części badawczej rozprawy wynikało, że Autor obliczył współczynnik korelacji, niestety w części metodycznej pracy Autor nie dodał wzoru i nie opisał logiki obliczania korelacji.

- Strona 33 - "*At the input of the network will be given the values of measurements of observable quantities at selected points, at the output will be given the values of parameters defining the problem 'directly' ...*". Niestety, w rozprawie Autor nie przedstawił danych liczbowych (wejściowych i wyjściowych), a jedynie ich zakresy. Proszę wyjaśnić.
- Strona 41. Proszę o wyjaśnienie, co oznacza zapis "*assigns the correct function values to all arguments*". Z reguły proces uczenia sieci neuronowych kończy się po ostatniej epoce lub wymuszony w przypadku korzystania z funkcji EarlyStopping Callback.
- Na str. 43 Autor opisuje podział zbioru danych na część uczącą i testową. Cały zbiór danych stanowi 150 rekordów, z tego 1/4 to część testowa. Jednocześnie $150/4 = 37,5$. Powszechnie wiadomo, że zbiór danych może być tylko liczbą całkowitą. Proszę wytłumaczyć, dlaczego wprowadzono taki zapis.
- Rozdziały 5.3.2 i 5.3.3. Jak Autor ocenił efektywność sieci? Dlaczego nie obliczono funkcji straty i współczynnik korelacji? Proszę rozwinąć wyjaśnienie.
- Strona 62. Wnioski. Jak stworzone modele można wykorzystać w praktyce do rozwiązywania problemów inżynierskich? Proszę rozwinąć i uzasadnij przypadki takiego wykorzystania.
- Wnioski z przeprowadzonych analiz i kierunki dalszych badań sformułowano prawidłowo, natomiast brakuje szerszej dyskusji uzyskanych wyników obliczeń numerycznych w nawiązaniu do literatury specjalistycznej.
- Czy na podstawie przeprowadzonych analiz Doktorant byłby w stanie podać własne zalecenia dotyczące wykorzystania sztucznych sieci neuronowych do rozwiązywania zagadnień odwrotnych na potrzeby projektowania geotechnicznego?
- Proszę o opinię dotyczącą możliwości wykorzystania proponowanego rozwiązania do rozwinięcia Metody Obserwacyjnej, wskazanej w normie Eurokod 7 do stosowania w projektowaniu geotechnicznym.

Ponadto, w recenzowanym egzemplarzu pracy zaznaczono dość liczne uwagi szczegółowe i sugestie natury gramatycznej, stylistycznej i nazewnictwa, które mogą być uwzględnione przez Doktoranta w przygotowaniu pracy lub jej części do publikacji.

Przykładowe sformułowania w pracy do korekty lub ponownego przemyślenia:

- Strona 13, „*An example of its use can be the problems of classification, logistic regression ...*”. Sztuczne sieci neuronowe rozwiązują nie tylko zagadnienia regresji logistycznej, ale także zależności liniowych i różnego rodzaju zależności nieliniowych (krzywoliniowych, ortogonalnych, parabolicznych itp.).
- Fig. 2.5 powinien być edytowany na dwóch stronach, z odpowiednim pogrupowaniem nazw funkcji, wykresów i opisów.
- Strony 45 - 62. Błędna numeracja rysunków, ponowna numeracja od 4.1, itd. W podpisach rysunków używano Fig. 4.1 (str. 36), lub Figure 4.1 (str. 45), powinno to być ujednoczone.
- Strona 23. „*According to the author, artificial neural network algorithms are performing better than ever in technical applications.*” Zdanie nie jest jasne, należy rozwinąć tą myśl lub ponownie zredagować.
- Strona 69. „*... as used in this article*”. Może „... w niniejszej pracy doktorskiej” (?)
- Niektóre rysunki są nieczytelne, słabej jakości (np. Rys. 4.2, 4.3, 4.4, 4.6, 4.7, 4.8, 6.7, ...), należy to poprawić przy przygotowaniu rozprawy lub jej części do publikacji.

Powyższe uwagi mają charakter redakcyjny i dyskusyjny i nie umniejszają wartości naukowej opiniowanej rozprawy doktorskiej, którą uznaję za znaczącą dla wykorzystania i rozwoju narzędzi do numerycznego rozwiązywania zagadnień bezpośrednich i odwrotnych w projektowaniu geotechnicznym, analizującym interakcje gruntu z konstrukcją.

5. Podsumowanie

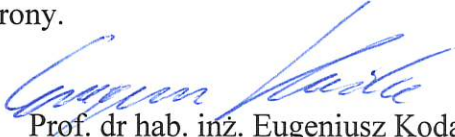
Podsumowując recenzję pracy doktorskiej mgr. inż. Artura Górala stwierdzam, że:

- Doktorant przeprowadził studium literaturowe dotyczące teoretycznych i koncepcyjnych podstaw działania sztucznych sieci neuronowych oraz możliwości ich wykorzystania jako substytutu rozwiązań z wykorzystaniem narzędzi numerycznych;
- Sformułował zagadnienie „wprost” i zagadnienie odwrotne oraz uwarunkowania związane z rozwiązaniami tych zagadnień; przedstawił metodę rozwiązania problemu odwrotnego, opartą na wykorzystaniu sztucznych sieci neuronowych jako narzędzia pomocniczego;
- Zastosował metodę do rozwiązania przykładów z zakresu inżynierii geotechnicznej;
- Przedstawił sposób formułowania zagadnienia uproszczonego z wykorzystaniem metod numerycznych do rozwiązania zagadnienia odwrotnego;

- Przedstawił przykład wytrenowania sieci „wprost” z wykorzystaniem aproksymującej krzywej uzyskanej w wyniku testu oraz wytrenowania sieci odwrotnej, na wyjściu której można uzyskać nieznane parametry krzywej Meyera-Kowalowa, w tym nośności pała;
- Przedstawił możliwość zastosowania sztucznych sieci neuronowych do interpretacji czaszy dynamicznego ugięcia powierzchni pod działaniem spadającej masy w teście FWD, wykorzystywanym do oceny parametrów mechanicznych warstw nawierzchni i podbudowy dróg, posadzek i lotnisk;
- Przedstawił koncepcję uproszczenia złożonego modelu geotechnicznego zawierającego obszar struktury budowlanej w interakcji z obszarem ośrodka gruntowego, polegającą na zbudowaniu złożonej sieci neuronowej, łączącej fragmenty sieci „wprost” (wytrenowanej uproszczonym modelem „odniesienia”) z fragmentami z sieci odwrotnej (wytrenowanej na rozwiązaniach modelu zredukowanego); wskazał na możliwości zastosowania procedury do modelowania złożonych zadań geotechnicznych;
- Sformułował syntetyczne wnioski, przedstawił ograniczenia metody oraz perspektywy dalszych badań nad jej rozwojem i sposobami weryfikacji wyników modelowania numerycznego bezpośrednich i odwrotnych problemów interakcji gruntu z konstrukcją;
- Wykazał dużą wiedzę z zakresu mechaniki gruntów i geotechniki, oraz dobrze opanowaną metodykę interpretacji i weryfikacji uzyskanych wyników modelowania numerycznego.
- Napisał pracę doktorską spójnie i metodycznie, dobrze zredagowaną;
- Udowodnił przeprowadzonymi analizami, szczególnie w zakresie interpretacji wyników modelowania numerycznego, postawioną tezę rozprawy i osiągnął zamierzony jej cel.

Praca doktorska mgr. inż. Artura Górala spełnia wymagania Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. *o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (z późniejszymi zmianami)*. Rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i wykazuje wysoki poziom wiedzy Doktoranta w dziedzinie nauk *inżynieryjno-technicznych* w dyscyplinie naukowej *inżynieria lądowa i transport*, a także umiejętność samodzielnego prowadzenia analitycznej i eksperymentalnej pracy naukowej.

Wnoszę o przyjęcie rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Artura Górala przez Radę ds. Stopni Naukowych Politechniki Łódzkiej w dyscyplinach Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport, Architektura i Urbanistyka i dopuszczenie jej do publicznej obrony.


Prof. dr hab. inż. Eugeniusz Koda

